

# ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОЙ СВАРКОЙ С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ГОРЯЧЕЙ ПРИСАДКОЙ

*Смоленцев М.С., Коробов Ю.С.*

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия  
[smolentseff.misha@yandex.ru](mailto:smolentseff.misha@yandex.ru), [yukorobov@mail.ru](mailto:yukorobov@mail.ru).

**Аннотация.** Выполнена сварка высокопрочной стали типа 45Х2НМФБА толщиной 6,3 мм импульсно-дуговой сваркой с применением дополнительной горячей присадочной проволоки. Проведен анализ структуры сварного шва и линии сплавления сварного соединения, а также определена твердость и микротвердость сварного соединения.

**Ключевые слова:** дополнительная подогретая присадка, холодные трещины, высокопрочные стали, сварка, импульсно-дуговая сварка, микротвердость, структура сварного соединения.

## IMPROVING THE PRODUCTIVITY AND QUALITY OF HIGH-STRENGTH STEEL WELDS, PERFORMED BY PULSE-ARC WELDING WITH ADDITIONAL HOT ADDITIVE

*Smolentsev M.S., Korobov Yu.S.*

«Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin»,  
Yekaterinburg, Russia

**Abstract.** Welding of high-strength steel of type 45Cr2NiMoVNB with a thickness of 6.3 mm was carried out using pulse-arc welding with the use of an additional hot filler wire. The analysis of the structure of the weld and the fusion line of the welded joint was carried out, and the hardness and microhardness of the welded joint were determined.

**Key words** additional preheated additive, cold cracks, high-strength steels, welding, pulse-arc welding, microhardness, structure of the welded joint.

На сегодняшний день высокопрочные стали находят широкое применение в различных отраслях промышленности. Сочетание высокой прочности с достаточной пластичностью, вязкостью, хладостойкостью и удовлетворительной свариваемостью открывают широкие возможности использования их для изготовления сварных конструкций [1].

Одним из перспективных способов сварки высокопрочных сталей является дуговая сварка с дополнительной подачей в хвостовую часть сварочной ванны горячей присадки. Впервые данный способ сварки был разработан в МГТУ им. Н. Э. Баумана. Показано, что за счет расплавления дополнительной горячей присадки ДГП теплотой сварочной ванны без дугообразования и каплеобразования удастся значительно повысить коэффициенты перехода легирующих элементов в МШ [2, 3]. В качестве дополнительной присадки могут использоваться порошковые проволоки, которые расширяют возможности легирования и модифицирования МШ [3, 4, 5].

Ввод ДГП, подогретой до температуры 1000–1200 °С путем внедугового электроконтактного нагрева, позволяет снижать среднюю температуру сварочной ванны, так как ДГП является охладителем сварочной ванны. Регулируя скорость подачи ДГП, можно влиять на ТЦС, долю участия ОМ и коэффициент наплавки [6].

Ввод ДГП снижает долю участия ОМ, позволяя изменять состав МШ, что снижает склонность к ХТ и существенно повышает коэффициент наплавки (в 1,5–2,0 раза). Увеличение коэффициента наплавки позволяет увеличить сечение валика (высоту наплавки), уменьшить проплавление ОМ, сократить число проходов и существенно повысить производительность наплавки. Кроме того, металл ЭМ расплавляется теплом жидкого металла в глубине сварочной ванны без дугообразования и каплеобразования. Это снижает газонасыщение МШ, повышает коэффициенты перехода легирующих элементов, что позволяет сохранить более полно содержащиеся в ЭМ химически активные модификаторы и рафинирующие элементы [6].

Для проведения исследований была разработана установка для дуговой сварки с дополнительной горячей присадкой. Схема процесса дуговой сварки с ДГП в защитном газе представлена на рисунке 1.

Дополнительная горячая присадка нагревается проходящим током от отдельного источника питания, и подается в хвостовую часть сварочной ванны.

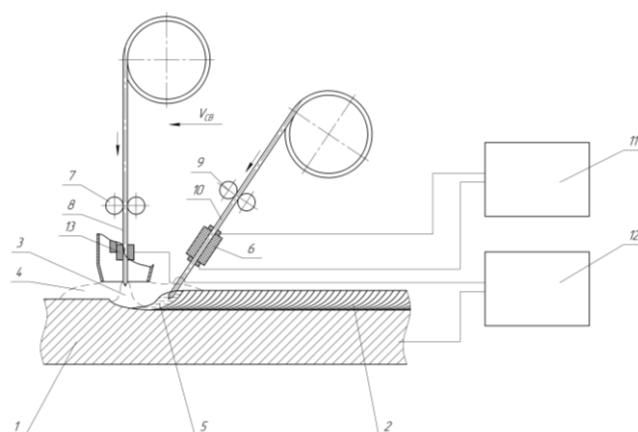


Рисунок 1 – Схема процесса дуговой сварки с ДГП в защитном газе: 1 – основной металл, 2 – сварной шов, 3 – сварочная дуга, 4 – защитная атмосфера, 5 – сварочная ванна, 6 – подогревающий элемент, 7 – подающий механизм для сварочной проволоки, 8 – сварочная проволока, 9 – подающий механизм для ДГП, 10 – дополнительная горячая присадочная проволока, 11 – источник питания для ДГП, 12 – основной источник питания, 13 – контактный наконечник

При сварке используется режим SpeedPulse (SP) с модифицированным импульсом. Под сварку были подготовлены пластины из броневого стали типа 45X2НМФБА, химический состав представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав стали типа 45X2НМФБА, мас.% [7]

<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Ni</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>	<i>V</i>	<i>Cu</i>
0,42- 0,5	0,17- 0,37	0,5- 0,8	1,3- 1,8	0,025	0,025	≤ 1,1	0,2- 0,3	0,1- 0,18	≤ 0,3

При сварке в качестве основной и присадочной проволоки применялась порошковая проволока ПП УТМ 7-3, диапазоны значений массовых долей основных легирующих химических элементов в присадочной проволоке представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Диапазоны значений массовых долей основных легирующих химических элементов в присадочной проволоке [8]

<i>C</i>	<i>N</i>	<i>Cr</i>	<i>Ti</i>	<i>Al</i>
0,3...0,4 %	0,1...0,2 %	18,5...22,0 %	0,08...0,20 %	0,05...0,10 %

Пластины собирались с зазором 2 мм с вводными и выводными планками. Сварка осуществлялась на сварочной защитной ленте для сварки Argweld Weld

Backing Tape. Образцы сваривались в два прохода, с зачисткой предыдущего слоя, режимы сварки представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Режимы сварки

Тип шва	$I_{св}, A$	$U_{св}, B$	$V_{св}, м /ч$	$V_{под}, м /мин$	$V_{под ДГП}, м /мин$	Расход газа, л /мин
Корневой	200	24,7	21	6,3	-	12
Заполняющий	180	34,5	16	10	2,8	12

Отработав режимы сварки, и сварив образец, представленный на рисунке 2, на них, получили следующие результаты.

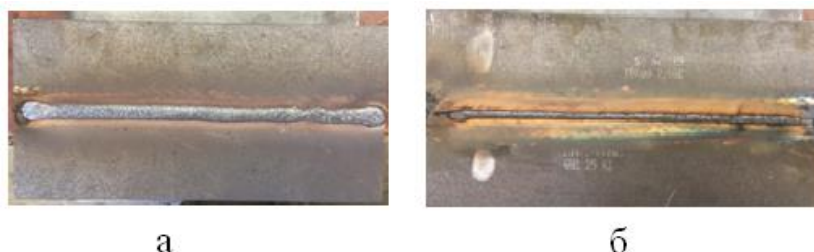


Рисунок 2 – Сваренный образец: а – с лицевой стороны; б – с обратной стороны

В ходе исследования были проведены результаты твердости сварного шва и основного металла. Для определения упрочнения за счет использования метастабильного аустенита необходимо провести предварительное деформирования металла шва (давление шариком: диаметр шарика 10 мм, нагрузка 3000 кг). При выполнении МШ порошковой проволокой УТМ 7-3 твердость в верхней части составляет HRC 45, в нижней части твердость составляет HRC 44.

Увеличение твердости в МШ после индентирования по методу «двумя твердомерами» показывает о наличии структуры с метастабильным аустенитом. В лунке от Бринелля (диаметр шарика 10 мм, нагрузка 3000 кг) твердость HRC 56. Результаты измерения микротвердости от оси шва (точка  $x = 10$  мм лежит на оси шва) представлены на рисунке 3.

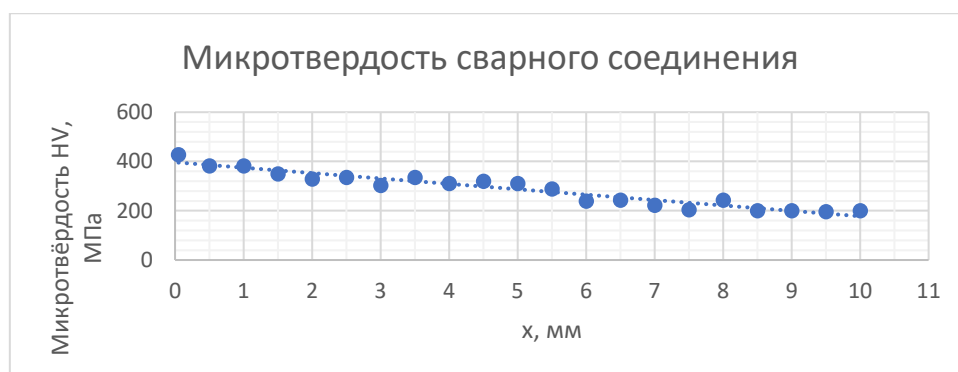


Рисунок 3 – Результаты микротвердости сварного соединения (точка 10 лежит на оси шва)

Микроструктура металла шва образца, представленная на рисунке 4, представляет собой метастабильный аустенит с равноосными зёрнами со средним диаметром порядка  $30\pm 10$  мкм, о чём можно судить по присутствию отдельных кристаллов мартенсита охлаждения пластинчатой формы, расположенных как вблизи границ, так и реже в теле зёрен, образовавшихся в участках шва, обеднённых по углероду и хрому, что свидетельствует о том, что, средняя температура Мн металла шва находится вблизи комнатной температуры. По границам зёрен, присутствуют мелкодисперсные карбиды. На расстоянии до 0,5 – 1 мм от границы шва зёрна аустенита приобретают более вытянутую форму, ориентированную длинной осью перпендикулярно границе шва. На расстоянии до 0,3 мм от границы количество отдельных кристаллов мартенсита охлаждения несколько возрастает, составляя по-прежнему менее 5 %, что указывает на более интенсивное обеднение этой переходной зоны по углероду и хрому. В пограничном участке зона сплавления имеет зубчатое строение с заходом участков аустенита в основной металл.

Структура основного металла, примыкающая к границе шва, представляет собой крупнопластинчатый сорбит отпуска, сохраняющий пластинчатое строение мартенсита после термообработки и окончательного нагрева. В остальной части основного металла структура, состоит из мелкодисперсного сорбита отпуска или мелкодисперсного перлита.

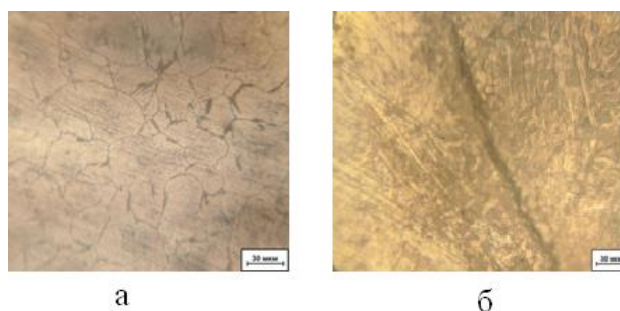


Рисунок 4 – Структура: а – сварного шва; б – зоны сплавления сварного соединения

Проведя исследование сварного соединения можно сделать вывод о том, что в структуре сварного шва присутствует метастабильный аустенит, который в свою очередь при механическом воздействии способен упрочняться до показателей основного металла, что подтверждается измерением твердости до механического воздействия и после него. Проведенный структурный анализ подтвердил аустенитную структуру сварного шва. Следовательно, можно сделать вывод о том, что предложенную методику сварки рационально применять при сварке высокопрочных сталей.

### **Библиографический список**

1. Смоленцев А. С. Пути решения проблемы свариваемости высокопрочных сталей, склонных к закалке (обзор) / А. С. Смоленцев // Сварка и диагностика. – 2019. – № 3. – С. 48–53.
2. Tadahisa Tsuyuyama, Kiyomichi Nakai, Takumi Tsuji (Разработка метода сварки под флюсом с применением горячей присадки). Welding in the World [Prod. of the Springer], V. 58, I. 5, p. 713-718. DOI: 10.1007/s40194-014-0153-8.
3. Совершенствование процесса сварки хладостойких сталей путем оптимизации баланса тепловой энергии дугового источника / Н. П. Алешин [и др.] // Сварочное производство. – 2018. – № 10. – С. 3-13.
4. Каховский Н. И. Электродуговая сварка сталей: справочник / Н. И. Каховский, В. Г. Фартушный, К. А. Ющенко. – Киев : Наукова думка, 1975. – 479 с.
5. Куликов В. П. Технология сварки плавлением и термической резки : учебник / В. П. Куликов. – Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА–М, 2016. – 463 с.
6. Современное состояние и проблемы свариваемости высокопрочных закаливающихся сталей / А. В. Березовский [и др.] // Тяжелое машиностроение. – 2021. – № 7–8. – С. 2–9.
7. Бронелисты 45Х2МФБА [Электронный ресурс] / Хаммерсмит – Режим доступа: <https://хаммерсмит.бел/catalog/listovoj-prokat/bronelistyi/bronelistyi-45x2mfba>, свободный. (Дата обращения: 02.09.2021).
8. Проволока для сварки среднеуглеродистых среднелегированных броневых сталей : пат. № 2692145 Рос. Федерация : СПК В23К/30 (2019.02) ; С22С38/28 (2019.02) / Коробов Ю. С., Шумяков В. И., Прохорович В. Е., Шипша В. Г., Пименова О. В., Давыдов Ю. С., Разиков Н. М., Гончаров С. Н., Кутаков С. В., Беспмятных А. Е. – Екатеринбург ; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина». – № 2017144969 ; заявл. 20.12.2017 ; опубл. 21.06.2019, Бюл. № 18.